

라이너를 고려한 원전 격납건물 벽체의 인장파괴거동

Tensile Failure Tests of Containment Wall Model Considering Liner

조남소, 김남식
현대건설기술개발원
경기도 용인시 구성읍 마북리 102-4

전영선
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

통상적인 원전 격납건물 설계에서 라이너는 최종적으로 극한 내압에 의한 방사물질의 차폐를 위한 기능적 부재로 간주된다. 그러나 라이너의 단면은 격납건물 벽체의 단면에서 작지 않은 부분을 차지하므로 이에 대한 기여를 평가할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 라이너가 합성된 철근콘크리트 격납건물 모형 실험체에 대한 인장 파괴 실험을 수행하여 균열하중에서의 기여도를 평가하고 콘크리트의 응력-변형률 관계에 미치는 영향을 분석하였다.

Abstract

General design works in containment building would ignore liner plate just taking for a functional member to finally prevent the radioactive material to the environment while the ultimate internal pressure occurs. However, since the sectional area of liner actually occupy a quite portion of containment wall section, it is necessary to evaluate the contribution of liner to containment behavior. Therefore, tensile failure tests for full-scale partial containment wall model had been carried out to investigate the cracking behavior and the stress-strain relationship of concrete as considering liner.

1. 서 론

원전 프리스트레스 콘크리트 격납건물의 벽체는 텐던과 철근콘크리트가 구조부재로써 내압을 지지하며, 이의 내측에는 6mm의 라이너판이 내벽을 두르고 있다. 라이너의 가장

중요한 역할은 극한 내압시 방사물질의 최종적인 차폐기능을 수행하는 것이다. 통상적인 격납건물의 설계에서 기능적인 부재로 간주되는 라이너는 구조적인 거동 자체를 무시하고 있는데, 사실 콘크리트 순단면적에 대한 라이너의 강재비를 계산해 보면 대략 0.5%에 해당하고 낮은 철근비(0.8%)를 갖는 벽체의 철근비의 60% 정도에 상당한다. 원전 설계가 사고의 중대성을 고려하여 다른 구조물과는 달리 매우 보수적으로 실시되는 점에서 볼 때, 구조부재로서의 라이너 역할은 무시할 수 있겠으나 라이너가 포함된 파괴까지의 거동을 살펴보는 것도 격납건물의 파괴 예측에 도움이 된다고 할 수 있다. 따라서, 라이너가 포함된 격납건물 벽체 모형에 대한 인장 파괴 실험을 수행하여 콘크리트의 균열 거동을 조사하고, 콘크리트의 응력-변형률 관계를 도출하여 라이너의 영향을 살펴보고자 하였다.

2. 실험체 및 실험장치

영광 원전의 격납건물은 벽체의 두께가 1.2m이고, 6mm의 라이너판이 수직보강재를 통해 내벽 콘크리트에 정착되어 있다. 그림 1은 격납건물을 원환방향으로 자른 도우넛 모양에서 일부분을 그대로 떼어낸 Full-scale 부분모형 실험체의 도면이다. 철근을 3-D29 (SD40)로 배근하여 철근비가 0.8%가 되도록 하였다. 한편, 격납건물과 같은 원통형 구조물의 내압에 따른 변형 형상을 살펴보면, 방사방향으로의 변위가 동일하여 원주방향으로의 변형률 역시 같게 된다. 따라서 실험체의 단면 중앙에 철근을 배근하여 종방향(원환방향)으로의 변형률이 일정하게 유발되도록 실험상의 고려를 하였다. 또한 실험체 단부에서 철근 정착의 유효성을 고려하여 양측 단부로부터 실험체 내측으로 750mm의 범위는 실험 결과의 분석에서 배제하도록 하였다. 라이너를 포함한 실험체(LRC) 2개와 라이너가 포함되지 않은 철근콘크리트 실험체(RC) 3개를 제작하여 상대적인 비교를 하였다.

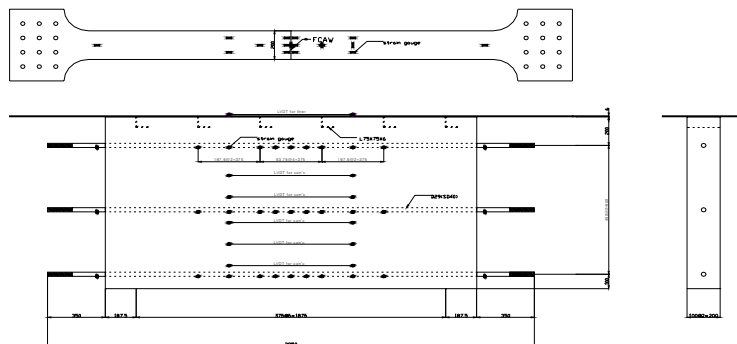


그림 1 실험체 설계 및 센서 위치

그림 1에는 실험에서 사용한 센서의 위치를 함께 표시하였다. 총 50개의 스트레인 게이지를 철근과 라이너에 설치하였고 6개의 LVDT를 콘크리트와 라이너 표면에 설치하여 국부 변형률 및 평균 변형률을 측정하였다. 실제 원전 격납건물의 변형 형상을 고려하여, 유압가력기에 의한 변위 제어 방식으로 라이너와 철근에 동일한 변형을 유발하도록 인장 가력하였다. 그림 2는 증기양생 후의 LRC 실험체 모습이고, 그림 3은 실험장치를 구성한 모습이다.



그림 2 제작된 실험체 모습



그림 3 실험체 및 실험장치 구성

3. 균열 및 파괴거동

그림 4와 그림 5는 LRC 및 RC 실험체에 발생한 균열의 모습을 보인다. 그림에 나타난 격자의 실선은 실험 전에 백색 페인트를 도포한 후 그린 것으로, 가력의 수직 방향 보조 실선의 간격은 375mm이며 LRC 실험체의 경우 수직보강재의 위치를 나타내고, 가력 방향으로의 실선(간격 450mm)은 철근의 위치를 표시하여 준다. 나머지의 실선은 철근콘크리트 실험체에 발생한 실제의 균열을 나타내며, 주균열(primary crack)을 형성한다.

실험체에서 발생한 첫 균열은 실험체의 운반을 위해 미리 설치한 Lift-lug에서 발생하였다. 이는 실험체의 다른 단면에 비해 콘크리트의 단면 손실이 상대적으로 크기 때문이라고 생각된다. 그러나, 당초 실험 계획에서부터 실험체의 외곽부는 철근과 콘크리트의 정착길이 부족으로 인한 부착강도 감소의 우려로 인해 고려의 대상이 아니었기 때문에 이 부분은 실험 결과 분석에서 배제하였다. 따라서, 첫 균열(①)은 실험체의 중앙에서 발생하였고, 곧이어 첫 균열의 근방에서 두 번째, 세 번째의 균열(②, ③)이 순차적으로 발생하였으며, 보조 실선의 간격과 등간격을 유지하였다. 균열의 진전 방향은 일반적인 예상과 같이 하중의 가력방향에 대해 수직으로 발생하였고, 대체적으로 곧은 것으로 여겨지므로 역으로 실험체에 도입된 하중이 편심없이 재하된 것을 알 수 있다. 이후 지속된 재하에 의해 콘크리트는 철근과 라이너로부터 탈락되어 실험은 종료되었다.

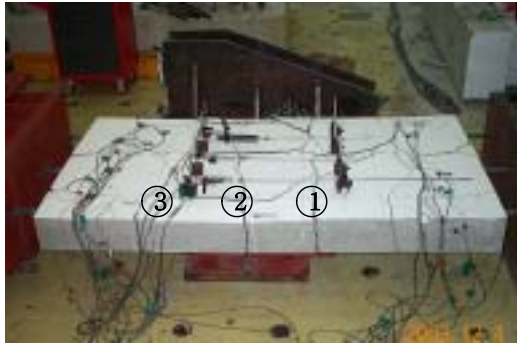


그림 4 RC의 균열 모습

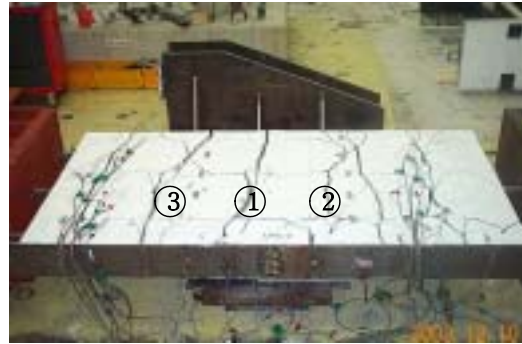


그림 5 LRC의 균열 모습

그림 6은 각각의 RC 실험체에 도입된 하중을 철근의 단면적으로 나눠 응력을 계산하고 각 측정장치로부터 얻은 변형률의 평균값에 대한 응력-변형률 관계이고, 그림 7은 LRC에 재하된 하중을 철근과 라이너의 강성비율에 따라 나눠 각각의 단면에 대한 응력을 계산하고 측정장치의 평균변형률에 대해 도시한 응력-변형률 관계로써 실험체들의 평균을 취한 것이다. 두 그림 모두 콘크리트에 발생하는 균열은 응력-변형률 곡선에서 급격한 변형률의 증가를 수반하게 하고, 추가의 균열로 인해 계단형태의 강성저하를 보이며 진전하였다. 이론적으로는 결국 모든 하중을 철근 또는 라이너가 부담하여야 하므로 항복이후에는 철근이나 강관의 재료 거동에 수렴하여야 하나 각각의 소성영역에서 항복응력보다 다소 높은 응력을 나타내고 있다.

인장을 받는 철근콘크리트에서 철근의 항복 시점에 대해 재료의 철근보다 낮게 평가되어야 한다는 게 일반적인 생각이다. 그러한 근거로 철근콘크리트에 매입된 철근은 균열이 발생한 단면에서 재료의 항복응력에 먼저 도달하여 소성 상태에 들어가며 이 때 매입 철근의 평균 응력-변형률의 관계에서 기울기가 변하기 때문이다.

한편 매입 철근의 항복 후 콘크리트의 균열 거동을 살펴보면, 추가적인 균열이 발생하여 평균 변형률의 증가로 이어지지 않고, 기존의 균열 단면에서 지속적으로 변형률이 증가하여 평균 변형률을 증가시키는 양상을 보인다. 이는 균열단면에서 철근의 소성흐름으로 인해 발생하는 것으로 이해되며, 균열 사이의 매입 철근은 아직도 콘크리트의 인장강성 효과를 기대할 수 있으므로 재료 철근의 항복응력을 초과할 수 있다.

콘크리트의 균열과 관련한 철근의 항복 거동은 중국적으로 상당한 변형률이 발생한 후, 즉 철근과 콘크리트의 부착이 완전히 소멸된 상태에서는 재료 철근과 같게 거동할 것으로 예상된다.

표 1은 균열 시점에서 실험체별 균열하중과 응력을 균열변형률의 시점에서 계산하여 정리한 것이다. 라이너 합성 철근콘크리트 실험체(LRC)는 철근콘크리트 실험체(RC)에 비해 균열하중이 9.7% 높았는데, 균열의 시점까지 라이너가 10% 정도의 하중지지 효과가 있다는 것을 지시한다. 또한 콘크리트의 응력이 8.0% 높았고, 철근의 응력은 29.8% 작았는데, 균열의 시점이 철근이나 라이너의 항복 시점보다 훨씬 낮고 탄성계수가 거의 동일하기

때문에 라이너를 단순히 철근으로 치환하여 철근비를 재계산하면, LRC 실험체의 철근비는 RC 실험체의 철근비에 1.73배가 된다. 따라서 철근비가 높은 경우 콘크리트의 응력은 높고 철근의 부담 응력은 낮게 되는 일반적인 거동 경향을 나타내었다.

LRC의 경우 라이너와 콘크리트의 합성정도가 결과분석에 지대한 영향을 줄 수 있다. 표 1에서 제시된 균열변형률은 라이너의 완전합성을 가정한 경우(composit)와 부착되지 않고 독립적인 경우(not comp.)로 나눠 계산한 것이다. 라이너의 완전합성을 가정한 경우가 비부착을 가정한 경우보다 59% 정도 변형률을 크게 나타내었으며 비부착을 가정한 경우가 RC의 균열변형률과 유사하였다. 이는 재하 초기부터 라이너가 온전히 콘크리트와 부착되어 합성 거동을 나타내지 않는다는 것을 의미한다.

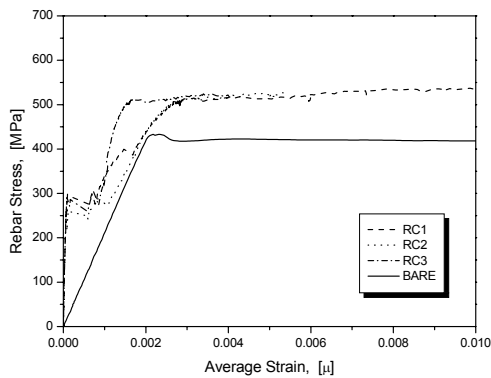


그림 6 RC의 응력-변형률 관계

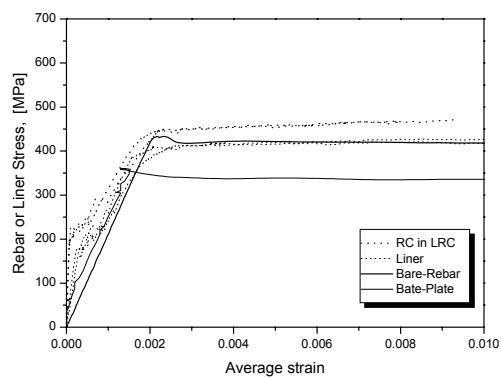


그림 7 LRC의 응력-변형률 관계

표 1 균열하중, 균열응력 및 균열 변형률

실험체	f_{ck} [MPa]	균열 하중 [kN]				균열 응력[MPa]			균열 변형률 ϵ_{cr}
		P	P_c	P_s	P_l	f_c	f_s	f_l	
RC1	53.6	575	540	34	-	2.24	298	-	0.000100
RC2	50.2	498	464	33	-	1.96	258	-	0.000074
RC3	47.9	561	522	39	-	2.20	291	-	0.000088
LRC1	47.2	604	541	40	23	2.29	200	183	0.000145(composite) 0.000067(not comp.)
LRC2	47.8	591	528	40	23	2.31	195	179	0.000117(composite) 0.000097(not comp.)

4. 콘크리트의 응력-변형률 관계

그림 8과 그림 9는 RC 실험체 각각에 대해서 LVDT에 의한 표면부 콘크리트의 평균 변형률과 철근의 변형률로 나타낸 심부 콘크리트의 평균변형률 상관관계를 나타낸다. 그림 8은 0.004까지의 변형률을 서로 비교한 것으로, 전반적인 변형률 증가 양상은 거의 같다는 것을 알 수 있다. 또한 균열 발생 직후 각 측정장치로부터 얻은 변형률은 철근과 콘크리트 모두 균열시점에서 급격한 변형률 증가를 경험하는 것을 보이고 있다.

균열발생 시점 부근인 0.0002까지의 부분을 확대하여 그린 그림 9를 보면 철근에 부착하여 얻은 변형률과 LVDT로부터 얻은 변형률은 상당한 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 균열발생 전 단계에서 철근과 콘크리트는 완전합성 거동을 한다고 가정한다면 동일한 기울기를 갖는 그래프로 나타나야 하기 때문이다. 이것은 실험체의 표면에 균열이 발생하기 전까지는 철근의 위치에 있는 콘크리트와 표면부의 콘크리트 사이에서 철근덮개 깊이에 따라 변형률이 비선형적으로 발생하고 있는 것을 가리키는 것으로 판단된다.

그림 10과 그림 11은 LRC 실험체에 대해 각 측정 장치를 통해 얻은 철근(R), 콘크리트(C) 및 라이너(L)의 평균 변형률에 대한 상대비교이다. 그림 10은 전체적인 변형률의 양상을 보여주는 것으로 각각의 측정 변형률이 동일하게 증가하는 것을 나타내지만, 이를 확대한 그림 11에서는 상당한 거동의 차이가 있음을 보여준다. 콘크리트에 대한 철근의 변형률(C-R) 차이는 가시적인 균열 발생 전 철근 위치의 콘크리트와 표면부 콘크리트사이에서 철근덮개 깊이에 따라 발생하는 변형률의 비선형성으로 이해되지만, C-L이나 R-L은 라이너의 상대적인 변형률이 항상 크다는 것을 나타내므로 재하 초기부터 철근에서와 같은 합성 정도를 기대하기는 어려울 것으로 보인다.

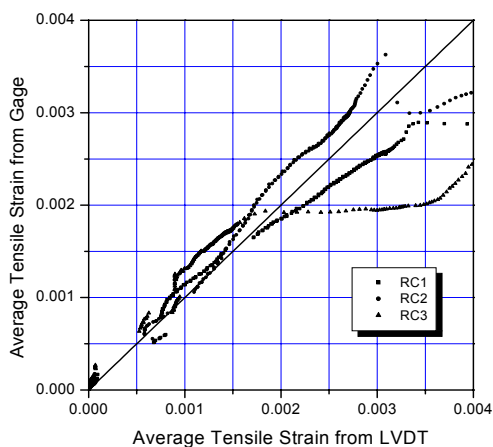


그림 8 RC 측정 변형률의 비교(0~0.004)

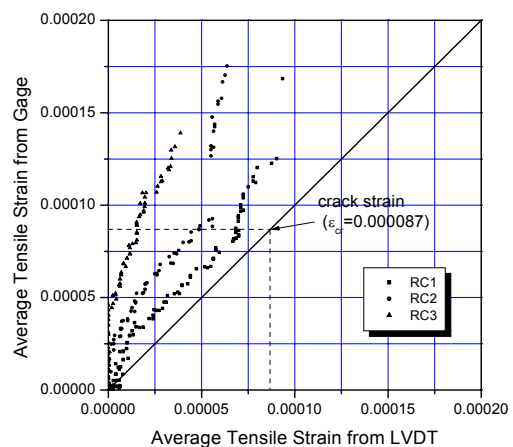


그림 9 RC 측정 변형률의 비교(0~0.0002)

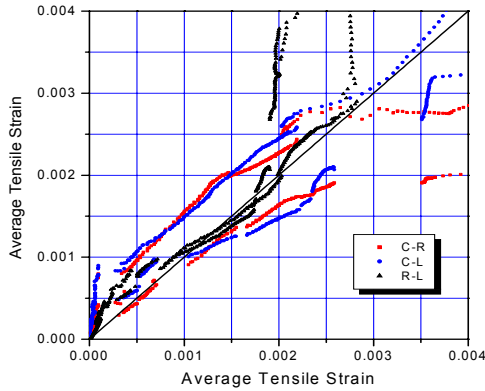


그림 10 LRC 측정 변형률의 비교(0~0.004)

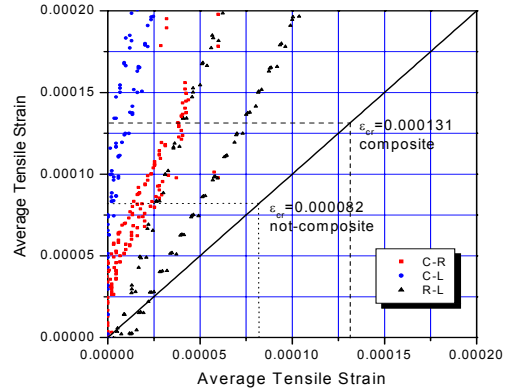


그림 11 LRC 측정 변형률의 비교(0~0.0002)

Eq. 1은 RC 실험체에서 측정된 평균변형률(ϵ_t)에 대해 콘크리트의 응력(f_t)을 계산하는 관계식이고, Eq. 2는 라이너의 완전합성거동을 가정하여 철근, 콘크리트 및 라이너의 평균변형률에 대한 콘크리트의 응력을 계산한 식이고, Eq. 3은 비부착을 가정하여 라이너의 평균변형률(ϵ_1)을 독립적으로 간주하여 얻게 되는 콘크리트의 응력에 관한 식이다.

$$f_t = \frac{P}{A_c} - \rho_s E_s \epsilon_t \quad \text{Eq. 1}$$

$$f_t = \frac{P}{A_c} - (\rho_s E_s + \rho_l E_l) \epsilon_t \quad \text{Eq. 2}$$

$$f_t = \frac{P}{A_c} - \rho_s E_s \epsilon_t + \rho_l E_l \epsilon_1 \quad \text{Eq. 3}$$

그림 12와 그림 13에 RC에 대한 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 제시하였다. 그림 12에는 측정된 평균 변형률 데이터에 대해 회귀분석한 관계식도 제시하였는데, 각 실험체의 균열 전까지의 응력-변형률 거동을 부분적으로 잘 반영한다고 할 수 있으나 균열변형률을 상대적으로 과소 평가하는 결과를 준다. 따라서, 균열변형률에 대한 산술 평균으로부터 얻은 인장 응력-변형률 관계식이 비록 균열발생 전까지의 세부적인 거동과는 다소 차이를 가져다 주지만 균열 시의 거동에는 좀더 정확한 예측이 가능하다고 판단된다.

콘크리트 인장 응력-변형률 관계곡선의 연화부에 대해 여러 가지 모델이 제시되어 있는데, 그림 13에서 보는 바와 같이 이 연구에서는 직선의 형태와 Tamai(1987)가 제안한 곡선의 형태로 제시하였다. 직선의 경우는 각 실험체의 평균 응력-변형률 곡선에 대해 선형 회귀분석을 수행하여 Eq. 4와 같이 얻었다. 변형률이 0.002233 이후에는 콘크리트의 응력

분담이 이루어지지 않는다는 것을 의미한다. 이는 Eq. 1에 의한 응력 계산에서 이유를 찾을 수 있는데, 수학적으로 변형률의 증가에 따라 결국 응력은 0의 상태에 놓이게 되는 한계를 갖고 있기 때문이다. 그러나 실제로 콘크리트는 철근의 항복이후에도 부착강도는 완전히 소멸하지 않기 때문에 어느 정도의 인장 응력을 분담한다고 알려져 있다.

$$\frac{f_t}{f_{cr}} = 1 - \frac{\epsilon_t - \epsilon_{cr}}{0.002233 - \epsilon_{cr}} = 1 - \frac{\epsilon_t - 0.000087}{0.002233 - 0.000087} \quad \text{Eq. 4}$$

한편, Eq. 5는 Tamai가 제안한 콘크리트 연화모델에 대한 식으로, 변형률이 계속 발생함에 따라 지속적으로 콘크리트의 응력 부담을 지시해주기 때문에 Tamai에 의한 모델이 좀더 현실적인 반영이라고 할 수 있다.

$$f_t = f_{cr} \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_t} \right)^c \quad \text{Eq. 5}$$

따라서, 각 실험체의 인장 평균 응력-변형률 데이터에 대해 Eq. 5의 형태로 회귀분석을 수행하여 최적의 연화곡선을 구했는데, 이 때의 $c=0.447$ 이고 이를 그림 13에 나타내었다. 한편, 통상적으로 쓰이는 $c=0.4$ 일 때와 유사하며 균열 직후 강도의 손실 좀더 크게 평가하고 있다.

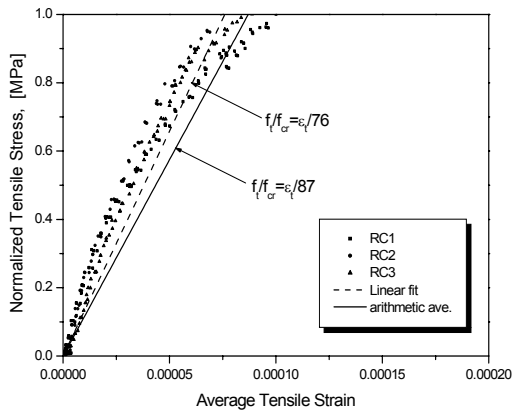


그림 12 RC의 균열전 응력-변형률 곡선

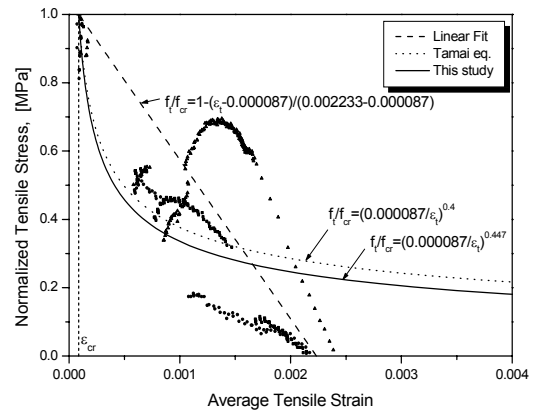


그림 13 RC의 균열후 응력-변형률 곡선

그림 14와 그림 15에는 LRC의 콘크리트 응력-변형률 관계를 나타내었다. RC와의 상대적인 비교를 위해 각 가정에 따른 균열변형률을 취해 $c=0.447$ 의 콘크리트 연화곡선을 함께 도시하였다. 라이너의 합성을 가정한 경우 라이너가 상대적인 변형률을 많이 발생하기 때문에 균열변형률이 라이너가 부착되지 않은 경우보다 크게 되고, 균열 이후 철근은 항

복에 먼저 도달하여 이를 반영한 인장 강성 효과는 Tamai의 식으로 제시된 연화곡선에서 콘크리트의 강도 손실을 좀더 급격하게 평가하였다. 한편, 철근콘크리트 실험체(RC)와 비교할 때, 라이너의 완전합성을 가정한 경우보다 부착되지 않은 것으로 가정하는 것이 콘크리트의 응력-변형률 거동과 유사하였으나 이 경우도 정도의 차이일 뿐 콘크리트의 강도 손실을 좀더 크게 평가하고 있다.

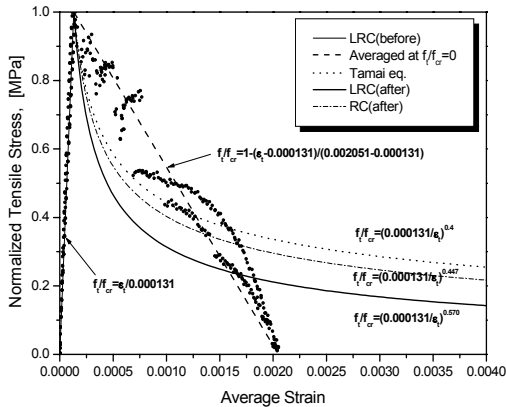


그림 14 완전합성을 가정한 경우

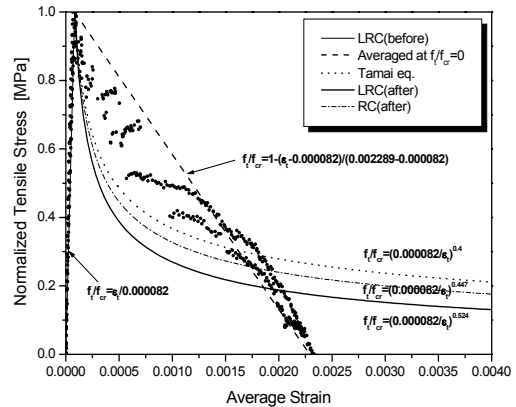


그림 15 라이너를 비부착으로 가정한 경우

5. 결론

철근콘크리트 및 라이너 합성 철근콘크리트의 인장 파괴 실험을 수행하여 분석한 결과를 다음과 같이 요약하였다.

- ① 철근콘크리트 실험체에 비해 라이너를 포함한 실험체는 균열 하중이 9.7% 증가하였으므로 실제 원전 격납건물에서 라이너는 균열 저항력을 증가시키는데 약 10% 정도의 기여도가 예상된다.
- ② 적어도 균열시점까지는 라이너가 단순히 철근비에 포함될 수 있으므로 설계 철근비보다 높은 철근비를 갖는 구조물로 거동하였으며, 균열 시의 콘크리트 응력은 8% 높고, 철근의 응력은 약 30% 정도 낮다는 것을 예상할 수 있다.
- ③ 균열은 단면 손실부인 라이너의 수직보강재에서 유도되었고 지속적인 재하에 따른 콘크리트의 탈락으로 인해 실험이 종료되었다. 이 때까지 라이너는 파괴되지 않고, 충실한 연성 거동을 나타내어 현행의 원전 설계 개념을 실험적으로 검증하였다.
- ④ 라이너와 콘크리트의 합성정도의 관점에 따라 변형률거동에 미치는 영향이 상당한 것으로 분석되었다. 라이너를 완전합성으로 가정할 경우 상대적으로 많은 변형률을 산출하는 라이너는 균열 변형률을 과대 평가하였으며, 균열 이후 콘크리트의 강도 손실

을 급격하게 나타내었다.

- ⑤ 콘크리트의 응력-변형률 거동을 종합적으로 평가하면, 라이너 합성 철근콘크리트에서 라이너를 부착되지 않고 독립적으로 가정하여 얻은 응력-변형률 관계가 라이너를 고려하지 않은 철근콘크리트의 응력-변형률 거동과 유사하였다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 연구비지원으로 수행되었으며, 이에 관계 당국에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 현대건설기술연구소, "프리스트레스 콘크리트 격납건물 부재실험", KAERI/CM-493/2001, 한국원자력연구소
- [2] Sandia National Laboratories "Pretest Analysis of a 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model", NUREG/CR-6685, Nuclear Regulatory Commission, Washington, 2000.
- [3] Satoru Shibata, Michel F. Hessheimer, Tomoyuki Kitani, Makoto Kondo, and James F. Costello "Investigation on liner tears of a 1:4-scale prestressed concrete containment vessel model subjected to internal overpressure".
- [4] M. F. Hessheimer, E. W. Klammer, G. S. Rightley, R. A. Dameron, S. Shibata, S. Mitsugi, and J. F. Costello "Preliminary Results of a 1:4-scale prestressed concrete containment vessel model test".
- [5] M. F. Hessheimer, D. W. Pace, E. W. Klammer, T. Matsumoto, and J. F. Costello "Instrumentation and testing of a prestressed concrete containment vessel model" SMiRT-14, Lyon.
- [6] Jae-Yeol Cho, Nam-Sik Kim, Nam-So Cho, and In-Kil Choi, "Cracking Behavior of Reinforced Concrete Panel Subjected to Biaxial Tension", ACI Struct. J. V.101, No.1, 2004. 1-2.
- [7] Jae-Yeol Cho, Nam-Sik Kim, Nam-So Cho, and Young-Sun, Choun, "Stress-Strain Relationship of Reinforced Concrete Subjected to Biaxial Tension", ACI Struct. J. V.101, No.2, 2004. 3-4.
- [8] Abdeldjelil Belarbi, "Stress-Strain Relationships of Reinforced Concrete in Biaxial Tension-Compression, Ph. D., University of Houston, Texas, 1991